



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 198 14 594 A 1**

51 Int. Cl. 6:  
**H01 L 41/22**  
F 02 M 51/06  
F 16 K 31/02

21 Aktenzeichen: 198 14 594.2  
22 Anmeldetag: 1. 4. 98  
43 Offenlegungstag: 7. 10. 99

DE 198 14 594 A 1

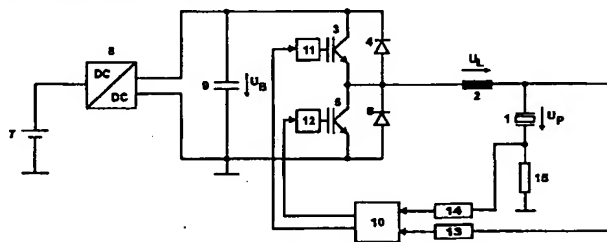
71 Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:  
Rueger, Johannes-Jörg, Dr., 71665 Vaihingen, DE;  
Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock,  
Alexander, 70435 Stuttgart, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Verfahren und Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements

57 Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zeichnen sich dadurch aus, daß der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang bereits eine gewisse Zeit vor dem Erreichen der gewünschten Spannung am piezoelektrischen Element beendet wird. Das piezoelektrische Element kann dadurch im Ergebnis exakt wunschgemäß weit geladen bzw. entladen werden; infolge des nicht sprungartig auf Null abfallenden Lade- bzw. Entladestromes wird das piezoelektrische Element nämlich auch eine gewisse Zeit nach dem Beenden des Ladens bzw. Entladens weiter geladen bzw. entladen.



DE 198 14 594 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 8, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft. Zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

Das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements kann unter anderem über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement wie beispielsweise eine Spule erfolgen, wobei diese Spule in erster Linie dazu dient, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen. Eine solche Anordnung ist in Fig. 11 veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element ist in der Fig. 11 mit dem Bezugszeichen 101 bezeichnet. Es ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter 102 schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter 106 schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters 102, einer Diode 103, einer Ladespule 104, des piezoelektrischen Elements 101, und einer Spannungsquelle 105 besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters 106, einer Diode 107, einer Entladespule 108 und des piezoelektrischen Elements 101 besteht.

Die Diode 103 des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann; die Diode 107 des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann.

Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter 102 geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 geladen wird; die im piezoelektrischen Element 101 gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter 106 geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element 101 entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements 101 bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements 101 werden nach dem Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Ein derartiges Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen ist vorteilhaft, weil es mangels nennenswerter ohmscher Widerstände im Ladestromkreis und im Entladestromkreis verlustleistungsarm und unter nur relativ geringer Wärmeentwicklung erfolgen kann.

Andererseits sind aber das Ausmaß und der zeitliche Verlauf des Ladens und des Entladens häufig nicht ideal. Störend sind vor allem zeitlich variierende Lade- und Entladegeschwindigkeiten, mehr oder weniger stark ausgeprägte Einschwingvorgänge und ein nur teilweises oder zu starkes Laden und/oder Entladen des piezoelektrischen Elements, wodurch beim Entladen sogar ein Aufladen mit entgegengesetzter Polarität erfolgen kann.

Zur Behebung dieser Nachteile kann vorgesehen werden, das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements getaktet, d. h. unter wiederholtem Öffnen und Schließen des Ladeschalters während des Ladens bzw. unter wiederholtem Öffnen und Schließen des Entladeschalters während des Entladens durchzuführen.

Durch das getaktete Laden bzw. Entladen ändern sich die Funktion und Wirkungsweise der Ladespule 104 und der Entladespule 108.

Beim nicht getakteten Laden bzw. Entladen wirken die Ladespule 104 und die Entladespule 108 als das induktive Element eines im Zusammenwirken mit dem piezoelektrischen Element gebildeten LC-Reihenschwingkreises, wobei die Induktivität des induktiven Elements und die Kapazität des piezoelektrischen Elements den Verlauf und den Umfang des Ladens und des Entladens bestimmen (geladen und entladen wird jeweils nur mit der ersten Stromhalbwellen der ersten Schwingkreisschwingung, denn ein Weiterschwingen des Schwingkreises wird durch die im Ladestromkreis und Entladestromkreis enthaltenen Dioden unterbunden).

Beim getakteten Laden und Entladen werden die Ladespule 104 und der Entladespule 108 hingegen als ein Energie-Zwischenspeicher verwendet, der abwechselnd von der Stromversorgungsquelle (beim Laden) bzw. vom piezoelektrischen Element (beim Entladen) zugeführte elektrische Energie (in Form von magnetischer Energie) speichert und – nach einer entsprechenden Schalterbetätigung – die gespeicherte Energie in Form von elektrischer Energie an das piezoelektrische Element (beim Laden) bzw. einen anderen Energiespeicher oder einen elektrischen Verbraucher (beim Entladen) abgibt, wobei die Zeitpunkte und die Dauer (und damit auch der Umfang) der Energiespeicherung und der Energieabgabe durch die Schalterbetätigung(en) bestimmt werden.

Dadurch kann das piezoelektrische Element in beliebig vielen, beliebig großen und in beliebigen zeitlichen Abständen aufeinanderfolgenden Stufen wunschgemäß weit geladen und entladen werden.

Als Folge dessen können sowohl das Ausmaß als auch der zeitliche Verlauf des Ladens und/oder des Entladens wunschgemäß beeinflusst werden, und zwar weitgehend unabhängig von den technischen Daten des die induktiven Eigenschaften aufweisenden Bauelements und des piezoelektrischen Elements.

Die Genauigkeit, mit welcher das piezoelektrische Element durch ein derartiges Laden und Entladen auf eine gewünschte Spannung gebracht wird, ist aber immer noch nicht in allen Fällen ausreichend.

Eine noch höhere Genauigkeit ist beispielsweise oftmals erforderlich, wenn das piezoelektrische Element als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse einer Brennkraftmaschine verwendet wird. Die Spannung, auf die das piezoelektrische Element durch das Laden und Entladen gebracht wird, bestimmt nämlich die Kraftstoffmenge, die pro Einspritzvorgang eingespritzt wird, und für eine optimale Funktion der Brennkraftmaschine muß diese Kraftstoffmenge mit hoher Genauigkeit einer vorgegebenen Soll-Kraftstoffmenge entsprechen, was insbesondere bei kleinen Kraftstoffmengen (wie sie beispielsweise bei der Voreinspritzung vorkommen) bislang nicht immer voll zufriedenstellend gelungen ist.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 8 derart weiterzubilden, daß das piezoelektrische Element auf einfache Weise exakt auf einen wunschgemäßen Wert geladen und entladen werden kann.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) bzw. die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 8 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

Demnach ist vorgesehen,

- daß der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang bereits eine gewisse Zeit vor dem Erreichen der gewünschten Spannung am piezoelektrischen Element beendet wird (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.
- daß eine Lade- oder Entlade-Steuereinrichtung vorgesehen ist, die dazu ausgelegt ist, den Ladevorgang bzw. den Entladevorgang bereits eine gewisse Zeit vor dem Erreichen der gewünschten Spannung am piezoelektrischen Element zu beenden (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 8).

Dadurch, daß das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements nicht erst bei Erreichen der gewünschten Spannung beendet wird, kann verhindert werden, daß das piezoelektrische Element weiter als gewünscht geladen oder entladen wird. Das piezoelektrische Element wird nämlich durch den bei der Beendigung des Lade- bzw. Entladevorganges nicht sprunghaft auf Null zurückgehenden Lade- bzw. Entladestrom auch noch eine gewisse Zeit nach der Beendigung des Lade- bzw. Entladevorganges weiter geladen bzw. entladen. Beendet man den Lade- bzw. Entladevorgang zum richtigen Zeitpunkt vor dem Erreichen der gewünschten Spannung, so kann dadurch im Ergebnis genau die gewünschte Spannung am piezoelektrischen Element erreicht werden.

Das piezoelektrische Element kann so auf einfache Weise exakt auf einen wunschgemäßen Wert geladen und entladen werden.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind den Unteransprüchen, der folgenden Beschreibung und den Figuren entnehmbar.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Es zeigen

Fig. 1 ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements,

Fig. 2 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Lade-Phase (Ladeschalter 3 geschlossen) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 3 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Lade-Phase (Ladeschalter 3 wieder geöffnet) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 4 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Entlade-Phase (Entladeschalter 5 geschlossen) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 5 eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Entlade-Phase (Entladeschalter 5 wieder geöffnet) in der Anordnung nach Fig. 1 einstellenden Verhältnisse,

Fig. 6 die zeitlichen Verläufe des Ladestroms und der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung beim Laden des piezoelektrischen Elements durch die Anordnung gemäß Fig. 1,

Fig. 7 ein Kennlinienfeld zur Veranschaulichung der sich zwischen verschiedenen elektrischen Größen beim Laden des piezoelektrischen Elements durch die Anordnung gemäß Fig. 1 einstellenden Zusammenhänge,

Fig. 8 ein weiteres Kennlinienfeld zur Veranschaulichung der sich zwischen verschiedenen elektrischen Größen beim Laden des piezoelektrischen Elements durch die Anordnung gemäß Fig. 1 einstellenden Zusammenhänge,

Fig. 9 ein Kennlinienfeld zur Veranschaulichung der sich zwischen verschiedenen elektrischen Größen beim Entladen des piezoelektrischen Elements durch die Anordnung gemäß Fig. 1 einstellenden Zusammenhänge,

Fig. 10 ein weiteres Kennlinienfeld zur Veranschaulichung der sich zwischen verschiedenen elektrischen Größen beim Entladen des piezoelektrischen Elements durch die Anordnung gemäß Fig. 1 einstellenden Zusammenhänge, und

Fig. 11 eine herkömmliche Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entladen im folgenden näher beschrieben wird, sind beispielsweise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbesondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Einsatz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektrischen Elemente im Ansprechen auf das Laden ausdehnen und im Ansprechen auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung ist selbstverständlich jedoch auch dann anwendbar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Es wird nun unter Bezugnahme auf Fig. 1 eine Anordnung beschrieben, durch die ein oder mehrere piezoelektrische Elemente genau wunschgemäß weit geladen und entladen werden können.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel zu laden gilt, ist in der Fig. 1 mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet.

Wie aus der Fig. 1 ersichtlich ist, liegt der eine der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements 1 über einen (Meß-)

Widerstand 15 dauerhaft auf Masse (ist über den Widerstand 15 mit einem ersten Pol einer Spannungsquelle verbunden), wohingegen der andere der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements über eine (zugleich als Ladespule und Entladespule wirkende) Spule 2 und eine Parallelschaltung aus einem (im betrachteten Beispiel durch einen Transistor gebildeten) Ladeschalter 3 und einer Diode 4 mit dem zweiten Pol der Spannungsquelle und über die Spule 2 und eine Parallelschaltung aus einem (im betrachteten Beispiel ebenfalls durch einen Transistor gebildeten) Entladeschalter 5 und einer Diode 6 mit dem ersten Pol der Spannungsquelle verbunden ist.

Die Spannungsquelle besteht aus einer Batterie 7 (beispielsweise einer KFZ-Batterie), einem dieser nachgeschalteten Gleichspannungswandler 8, und einem diesem nachgeschalteten, als Pufferkondensator dienenden Kondensator 9. Durch diese Anordnung wird die Batteriespannung (beispielsweise 12 V) in eine im wesentlichen beliebige andere Gleichspannung umgesetzt und als Versorgungsspannung bereitgestellt.

Das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgen im betrachteten Beispiel getaktet. D. h., der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 werden während des Lade- bzw. Entladevorganges wiederholt geschlossen und geöffnet.

Die sich dabei einstellenden Verhältnisse werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 2 bis 5 erläutert, von denen die Fig. 2 und 3 das Laden des piezoelektrischen Elements 1, und die Fig. 4 und 5 das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 veranschaulichen. Bei den Darstellungen in der Fig. 2 bis 5 wurde der zur (Ent-)Ladestrommessung benötigte Widerstand 15 unberücksichtigt gelassen; dessen Einfluß kann für die vorliegenden Betrachtungen jedoch vernachlässigt werden.

Der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 sind, wenn und solange kein Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgt, geöffnet. In diesem Zustand befindet sich die in der Fig. 1 gezeigte Schaltung im stationären Zustand. D. h., das piezoelektrische Element 1 behält seinen Ladungszustand im wesentlichen unverändert bei, und es fließen keine Ströme.

Mit dem Beginn des Ladens des piezoelektrischen Elements 1 wird der Ladeschalter 3 wiederholt geschlossen und geöffnet; der Entladeschalter 5 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Ladeschalters 3 stellen sich die in der Fig. 2 gezeigten Verhältnisse ein. D. h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 2 durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 Energie gespeichert wird. Der Energiefluß in die Spule 2 wird dabei durch die positive Potentialdifferenz zwischen dem Kondensator 9 und dem piezoelektrischen Element 1 bewirkt.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu s$ ) nach dem Schließen des Ladeschalters 3 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 3 gezeigten Verhältnisse ein. D. h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, der Diode 6 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Fig. 3 durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in das piezoelektrische Element 1 fließt. Entsprechend der Energiezufuhr zum piezoelektrischen Element erhöhen sich die an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum piezoelektrischen Element 1 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder auch erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Ladevorgangs) wird der Ladeschalter 3 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie zu (die im piezoelektrischen Element bereits gespeicherte Energie und die neu zugeführte Energie summieren sich), und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zu.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 eine Vielzahl von Malen, so steigen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise an (siehe hierzu die Kurve A der später noch genauer erläuterten Fig. 6).

Wurde der Ladeschalter 3 eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element 1 den gewünschten Ladezustand erreicht, so wird das Laden des piezoelektrischen Elements durch Öffnenlassen des Ladeschalters 3 beendet.

Soll das piezoelektrische Element 1 wieder entladen werden, so wird dies durch ein wiederholtes Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 bewerkstelligt; der Ladeschalter 3 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Entladeschalters 5 stellen sich die in der Fig. 4 gezeigten Verhältnisse ein. D. h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie (ein Teil derselben) in die Spule 2 transportiert wird. Entsprechend dem Energietransfer vom piezoelektrischen Element 1 zur Spule 2 nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ab.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu s$ ) nach dem Schließen des Entladeschalters 5 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der Fig. 5 gezeigten Verhältnisse ein. D. h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9, der Diode 4 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in den Kondensator 9 zurückgespeist wird. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum Kondensator 9 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach Fig. 1 erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Entladevorgangs) wird der Entladeschalter 5 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie weiter ab, und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ebenfalls ab.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Entladeschalters 5 eine Vielzahl von Malen, so nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise ab.

Wurde der Entladeschalter 5 eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element den gewünschten Entladezustand erreicht, so wird das Entladen des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Entladeschalters 5 beendet.

Das Ausmaß und der Verlauf des Ladens und des Entladens sind durch die Häufigkeit und die Dauer des Öffnens und Schließens des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 bestimmbar, wobei sich die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geschlossen sind, und die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geöffnet sind, gleich oder unterschiedlich lang sein können und selbst innerhalb eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges beliebig verändert werden können.

Die Betätigung des Ladeschalters 3 und des Entladeschalters 5 wird durch eine Regeleinrichtung 10 veranlaßt; die von der Regeleinrichtung 10 ausgegebenen Schalterbetätigungssignale werden dem Ladeschalter 3 und dem Entladeschalter 5 über Treiber 11 und 12 zugeführt.

Die Regeleinrichtung 10 öffnet und schließt den Ladeschalter 3 und den Entladeschalter 5 unter anderem in Abhängigkeit von der sich am piezoelektrischen Element 1 einstellenden Spannung und der Größe des Ladestromes bzw. Entladestromes; die sich am piezoelektrischen Element 1 einstellende Spannung erhält die Regeleinrichtung 10 von einer Spannungsmeßeinrichtung 13, und die Größe des Ladestromes bzw. Entladestromes von einer Strommeßeinrichtung 14.

Der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 werden so betätigt, daß der Ladestrom bzw. der Entladestrom zwischen einem Maximalwert  $i_{\max}$  und einem Minimalwert  $i_{\min}$  pendeln. Der Maximalwert  $i_{\max}$  und der Minimalwert  $i_{\min}$  werden dabei so festgelegt, daß das piezoelektrische Element 1 durch das Laden bzw. Entladen innerhalb einer bestimmten Zeit auf eine bestimmte Spannung gebracht wird.

Wird das piezoelektrische Element wie vorliegend als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse eines Common Rail Injectors einer Brennkraftmaschine eingesetzt, so variieren die bestimmte Zeit und die bestimmte Spannung insbesondere in Abhängigkeit von

- 1) der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge,
- 2) der Motordrehzahl,
- 3) dem Druck im Rail, und
- 4) der Motortemperatur.

Der sich beim Laden des piezoelektrischen Elements ergebende Verlauf des Ladestromes und die sich als Folge dessen am piezoelektrischen Element einstellende Spannung sind in Fig. 6 veranschaulicht, wobei der Ladestromverlauf durch die Kurve B und der Spannungsverlauf durch die Kurve A repräsentiert werden.

Aus der Fig. 6 sind auch die Verhältnisse ersichtlich, die sich einstellen, wenn der Ladevorgang zum Zeitpunkt  $t_A$  durch Öffnen und Geöffnetlassen des Ladeschalters 3 beendet wird.

Die Beendigung des Ladevorganges bewirkt, daß der Ladestrom auf Null zurückgeht. Wie aus der Fig. 6 ersichtlich ist, vollzieht sich der Rückgang des Ladestromes dabei jedoch nicht etwa sprungartig, sondern nur allmählich innerhalb einer Zeitspanne  $t_0$ . Dies hat zur Folge, daß die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung auch nach dem Beenden des Ladevorganges weiter ansteigt, wobei dieser weitere Anstieg andauert, bis der Ladestrom auf Null abgesunken ist; die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung steigt innerhalb der Zeitspanne  $t_0$  von der zum Zeitpunkt  $t_A$  eingenommenen Größe  $U_A$  auf den sich nicht mehr ändernden Wert  $U_{\text{End}}$ .

Entsprechendes gilt auch für das Entladen des piezoelektrischen Elements.

Die Regeleinrichtung 10 ist im vorliegend betrachteten Beispiel dazu ausgelegt, das Laden des piezoelektrischen Elements (durch Öffnen und Geöffnetlassen des Ladeschalters 3) bzw. das Entladen des piezoelektrischen Elements (durch Öffnen und Geöffnetlassen des Entladeschalters 5) zu einem Zeitpunkt zu beenden, zu dem davon ausgegangen werden kann, daß die Spannung  $U_{\text{End}}$ , die sich durch das nach dem Beenden des Lade- bzw. Entladevorganges erfolgende weitere Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Element ergibt, genau die gewünschte Spannung ist, auf die das piezoelektrische Element durch das Laden bzw. Entladen desselben gebracht werden soll.

Dies wird im vorliegend betrachteten Beispiel dadurch realisiert, daß unter Berücksichtigung des momentanen (Ent-)Ladestromes  $i(t)$  und der sich momentan am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung  $u_p(t)$  fortlaufend die (Ent-)Spannung  $u_{\text{End}}$  bestimmt wird, die sich ergeben würde, wenn der (Ent-)Ladevorgang durch Öffnen und Geöffnetlassen des (Ent-)Ladeschalters augenblicklich beendet werden würde, und daß der (Ent-)Ladevorgang beendet wird, sobald die End-Spannung  $u_{\text{End}}$  die (Soll-)Spannung erreicht hat, auf die das piezoelektrische Element durch das (Ent-)Laden gebracht werden soll. Anders als in solchen Fällen üblich wird also nicht die momentane Ist-Spannung, sondern die im Voraus ermittelte End-Spannung  $u_{\text{End}}$  mit der Soll-Spannung verglichen.

Die Ermittlung der End-Spannung  $u_{\text{End}}$  basiert im vorliegend betrachteten Beispiel auf der Erkenntnis, daß piezoelektrische Elemente in erster Näherung kapazitives Verhalten aufweisen.  $u_{\text{End}}$  läßt sich damit aus

$$u_{\text{End}} = \frac{1}{C_p} \cdot \int_{t_A}^{t_A+t_0} i(t) dt + u_{p0} \quad (1)$$

berechnen, wobei

$C_p$  die Kapazität des piezoelektrischen Elements,

$i(t)$  den Ladestrom  $i_L(t)$  bzw. den Entladestrom  $i_E(t)$ ,

$u_{p0}$  die die sich zum Zeitpunkt  $t_A$  des des Öffnens und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters am piezoelektrischen Ele-

ment einstellende Spannung (die Spannung  $U_A$  gemäß Fig. 6),  
 $t_A$  den Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters, und  
 $t_0$  die Zeitspanne, innerhalb welcher der (Ent-)Ladestrom nach dem Öffnen und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters auf Null zurückgeht,  
 5 bezeichnen.

Da sich beim Laden nach dem Öffnen des Ladeschalters die in Fig. 3 gezeigten Verhältnisse einstellen, lassen sich der Ladestrom  $i_L(t)$  und die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung  $u_p(t)$  zu

$$10 \quad i_L(t) = i_0 \cdot \cos(\omega_L t) - \frac{u_{p0}}{L \omega_L} \cdot \sin(\omega_L t) \quad (2)$$

$$15 \quad u_p(t) = \frac{i_0}{C_p \omega_L} \cdot \sin(\omega_L t) - u_{p0} \cdot \cos(\omega_L t) \quad (3)$$

errechnen, wobei

$i_0$  den Ladestrom zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des Ladeschalters, und  
 20  $L$  die Induktivität der Spule 2  
 bezeichnen und

$$25 \quad \omega_L = \sqrt{\frac{1}{LC_p}} \quad (4)$$

gilt.

Damit errechnet sich die Zeitspanne  $t_0$ , innerhalb welcher der Ladestrom auf Null abgesunken ist, zu

$$30 \quad t_0 = \frac{1}{\omega_L} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{i_0 L \omega_L}{u_{p0}} \right) \approx \frac{i_0 L}{u_{p0}} \quad (5)$$

35 Setzt man  $i_L(t)$  gemäß Gleichung (2),  $u_p(t)$  gemäß Gleichung (3), und  $t_0$  gemäß Gleichung (5) in Gleichung (1) ein, so ergibt sich die gesuchte End-Spannung  $u_{End}$  zu

$$40 \quad u_{End} = \frac{i_0}{C_p \omega_L} \cdot \sin(\omega_L t_0) + u_{p0} \cdot \cos(\omega_L t_0) \quad (6)$$

Die End-Spannung  $u_{End}$  ist eine Funktion des Ladestromes und der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des Ladeschalters; sie kann entweder nach Gleichung (6) je-  
 45 weils aktuell berechnet oder einer entsprechenden Zuordnungstabelle entnommen werden.

Die Ermittlung der sich beim Entladen des piezoelektrischen Elements einstellenden End-Spannung erfolgt analog zur Ermittlung der sich beim Laden des piezoelektrischen Elements einstellenden End-Spannung.

Da sich beim Entladen nach dem Öffnen des Entladeschalters die in Fig. 5 gezeigten Verhältnisse einstellen, lassen sich der Entladestrom  $i_E(t)$  und die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung  $u_p(t)$  zu

$$50 \quad i_E(t) = i_0 \cdot \cos(\omega_E t) + \frac{u_{p0} - u_{B0}}{L \omega_E} \cdot \sin(\omega_E t) \quad (7)$$

$$55 \quad u_p(t) = \frac{i_0}{C_p \omega_E} \cdot \sin(\omega_E t) - \frac{u_{B0} - u_{p0}}{C_p L \omega_E^2} \cdot \cos(\omega_E t) \quad (8)$$

$$60 \quad + \frac{C_B u_{B0} + C_p u_{p0}}{C_B + C_p}$$

errechnen, wobei

65  $C_B$  die Kapazität des Kondensators 9,  
 $i_0$  den Entladestrom zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des Entladeschalters,  
 $L$  die Induktivität der Spule 2, und  
 $U_{B0}$  die sich zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des Entladeschalters am Kondensator 9 einstellende Span-

nung  
bezeichnen und

$$\omega_E = \sqrt{\frac{C_B + C_P}{L C_B C_P}} \quad (9)$$

gilt.

Damit errechnet sich die Zeitspanne  $t_0$ , innerhalb welcher der Entladestrom auf Null abgesunken ist, zu

$$t_0 = \frac{1}{\omega_E} \cdot \tan^{-1} \left( - \frac{i_0 L \omega_E}{u_{P0} - u_{B0}} \right) \approx - \frac{i_0 L}{u_{P0} - u_{B0}} \quad (10)$$

Setzt man  $i_E(t)$  gemäß Gleichung (7),  $u_P(t)$  gemäß Gleichung (8), und  $t_0$  gemäß Gleichung (10) in Gleichung (1) ein, so läßt sich auch die sich beim Entladen zu erwartende End-Spannung exakt im voraus ermitteln.

Wie beim Laden des piezoelektrischen Elements kann die zu ermittelnde End-Spannung entweder aktuell berechnet oder einer entsprechenden Zuordnungstabelle entnommen werden.

Die sich beim Entladen einstellende End-Spannung hängt im Gegensatz zu der sich beim Laden einstellenden End-Spannung zusätzlich von der sich zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des Entladeschalters am Kondensator 9 einstellenden Spannung  $U_{B0}$ , also von insgesamt drei unabhängigen Variablen ab. Die Abhängigkeit von der Spannung  $U_{B0}$  kann jedoch vernachlässigt werden, da diese Spannung gewöhnlich nur in einem sehr engen Spannungsbereich variiert und derartige Variationen keinen wesentlichen Einfluß auf die End-Spannung  $U_{End}$  haben. Damit sind auch beim Entladen des piezoelektrischen Elements "nur" der Entladestrom und die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung zu berücksichtigen.

Die Abhängigkeit der End-Spannung  $U_{End}$  und der nach dem Beenden des (Ent-)Ladevorganges durch Öffnen und Geöffnetlassen des (Ent-)Ladeschalters erfolgenden Veränderung der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung vom (Ent-)Ladestrom und der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters sind in den Fig. 7 bis 10 als Kennlinienfelder dargestellt, wobei die Fig. 7 und 8 das Laden des piezoelektrischen Elements, und die Fig. 9 und 10 das Entladen des piezoelektrischen Elements betreffen.

Die Fig. 4 bis 7 zeigen deutlich, daß die sich einstellende End-Spannung sehr stark vom (Ent-)Ladestrom zum Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters abhängt und es folglich sehr bedeutsam ist, den Zeitpunkt des Öffnens und Geöffnetlassens des (Ent-)Ladeschalters nicht nur in Abhängigkeit von der sich momentan am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung, sondern auch vom momentanen (Ent-)Ladestrom abhängig zu machen.

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, daß es nicht sinnvoll ist, den (Ent-)Ladestrom durch Verkleinern des Bandes, innerhalb dessen er pendeln kann, weniger schwanken zu lassen. Dann müßte nämlich der (Ent-)Ladeschalter häufiger und in kürzeren zeitlichen Abständen betätigt werden, was einen erheblichen Anstieg der Verlustleistung zur Folge hätte.

Das vorstehend beschriebene Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen erfolgte unter Verwendung einer Regeleinrichtung (der Regeleinrichtung 10). Wenn der (Ent-)Ladestrom und die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung ohne aktuelle Messung derselben, also beispielsweise rechnerisch oder unter Verwendung einer Tabelle bestimmbar sind, so kann anstelle einer Regeleinrichtung auch eine Steuereinrichtung verwendet werden. Dies hätte den Vorteil, daß auf die Spannungsmeßeinrichtung 13 und die Strommeßeinrichtung 14 verzichtet werden kann.

Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung ermöglichen es unabhängig von den Einzelheiten der praktischen Realisierung derselben, daß unter Verwendung derselben zu ladende oder zu entladende piezoelektrische Elemente exakt wunschgemäß weit geladen und entladen werden können.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1) auf eine gewünschte Spannung, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang bereits eine gewisse Zeit vor dem Erreichen der gewünschten Spannung am piezoelektrischen Element beendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements (1) unter wiederholtem Öffnen und Schließen eines im Ladestromkreis vorgesehenen Ladeschalters (3) bzw. eines im Entladestromkreis vorgesehenen Entladeschalters (5) erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Beenden des Ladevorganges bzw. des Entladevorganges durch Öffnen und Geöffnetlassen des Ladeschalters (3) bzw. des Entladeschalters (5) erfolgt.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang zu einem Zeitpunkt beendet wird, zu dem davon ausgegangen werden kann, daß die sich am piezoelektrischen Element (1) einstellende Spannung ( $u_P$ ) infolge des nicht sprungartig auf Null abfallenden Lade- bzw. Entladestromes noch genau bis zum Erreichen der gewünschten Spannung ansteigt bzw. abfällt.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß während des Ladens bzw. Entladens des piezoelektrischen Elements (1) fortlaufend die End-Spannung ( $u_{End}$ ) ermittelt wird, auf die das piezoelektrische Element noch weiter geladen bzw. entladen werden würde, wenn der Ladevorgang bzw. der Entladevorgang augenblicklich be-

# DE 198 14 594 A 1

det werden würde.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die fortlaufend ermittelte End-Spannung ( $u_{\text{End}}$ ) fortlaufend mit der Spannung verglichen wird, auf welche das piezoelektrische Element (1) durch das Laden bzw. Entladen gebracht werden soll.

5 7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die End-Spannung ( $u_{\text{End}}$ ) unter Berücksichtigung des momentanen Lade- bzw. Entladestroms und der sich momentan am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung ermittelt wird.

10 8. Vorrichtung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements (1) auf eine gewünschte Spannung, gekennzeichnet durch eine Steuer- oder Regeleinrichtung (10), die dazu ausgelegt ist, den Ladevorgang bzw. den Entladevorgang bereits eine gewisse Zeit vor dem Erreichen der gewünschten Spannung am piezoelektrischen Element zu beenden.

---

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

---

15

20

25

30

35

40

45

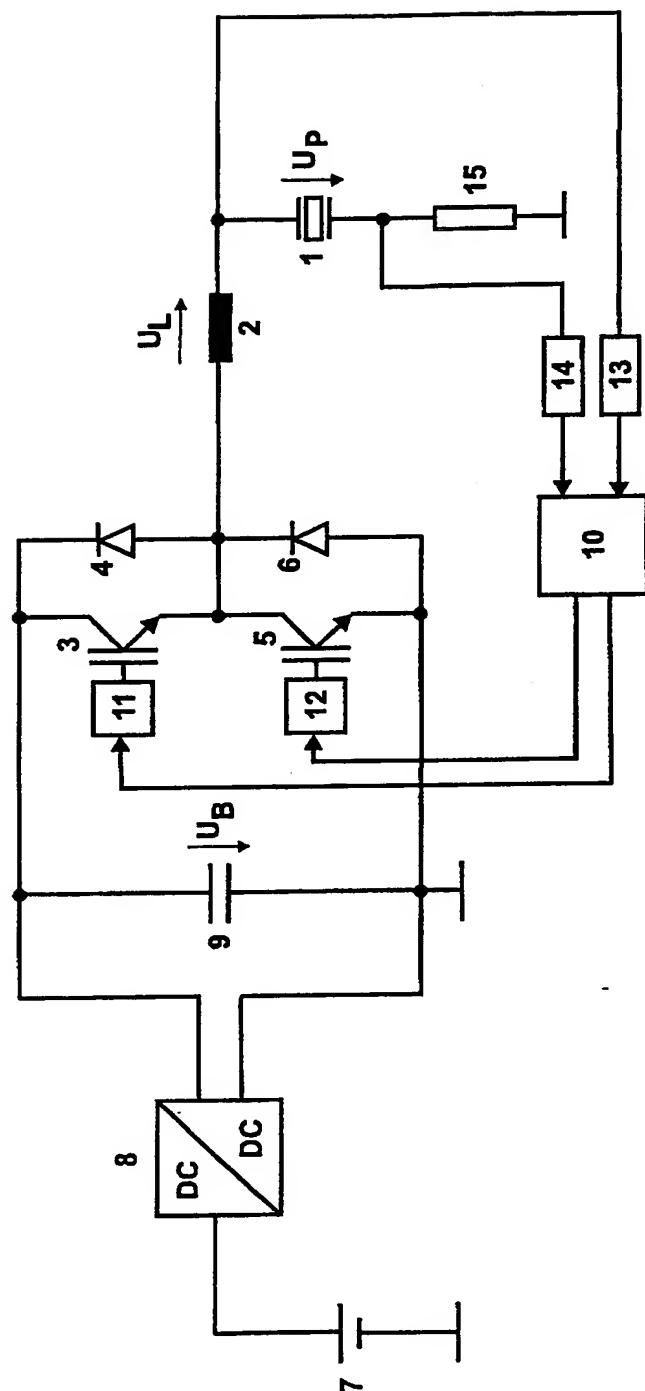
50

55

60

65





**FIG. 1**

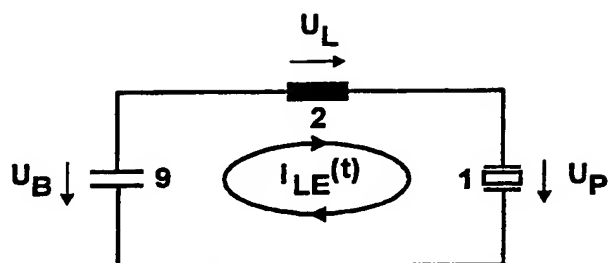


FIG. 2

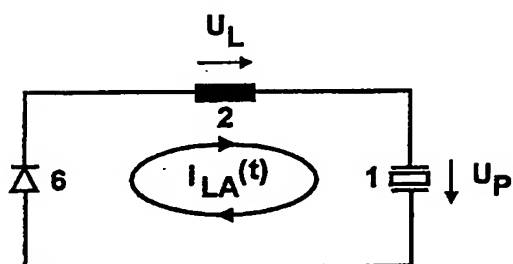


FIG. 3

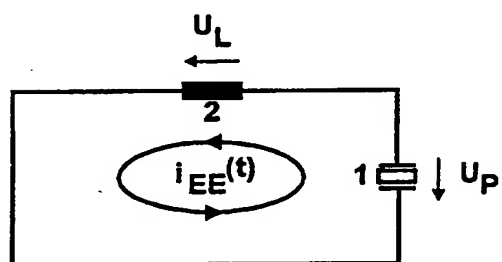


FIG. 4

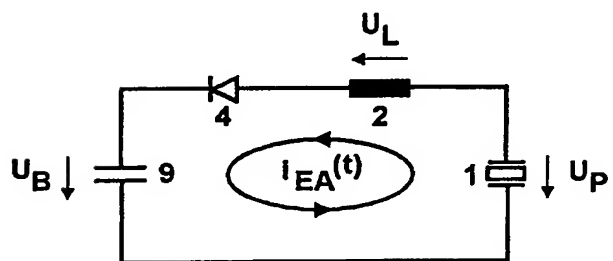


FIG. 5

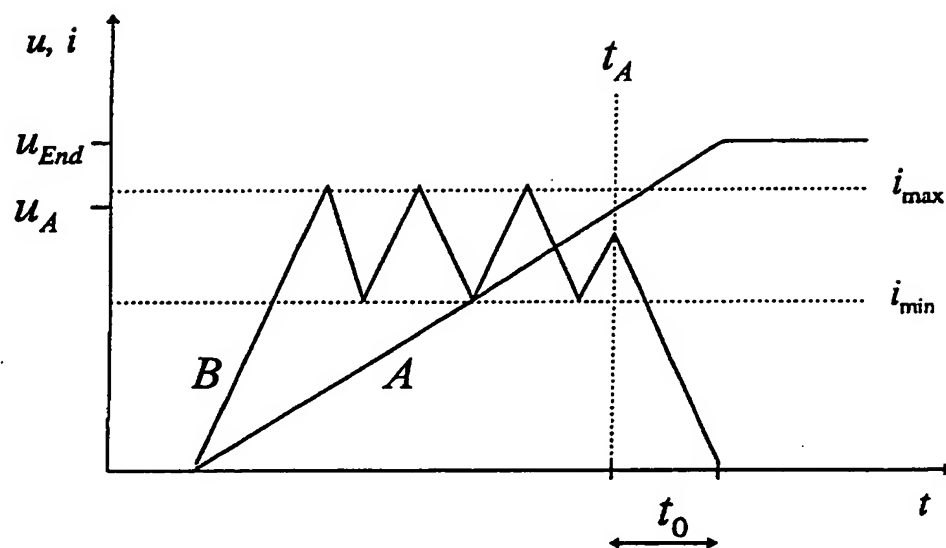


FIG. 6

BEST AVAILABLE COPY

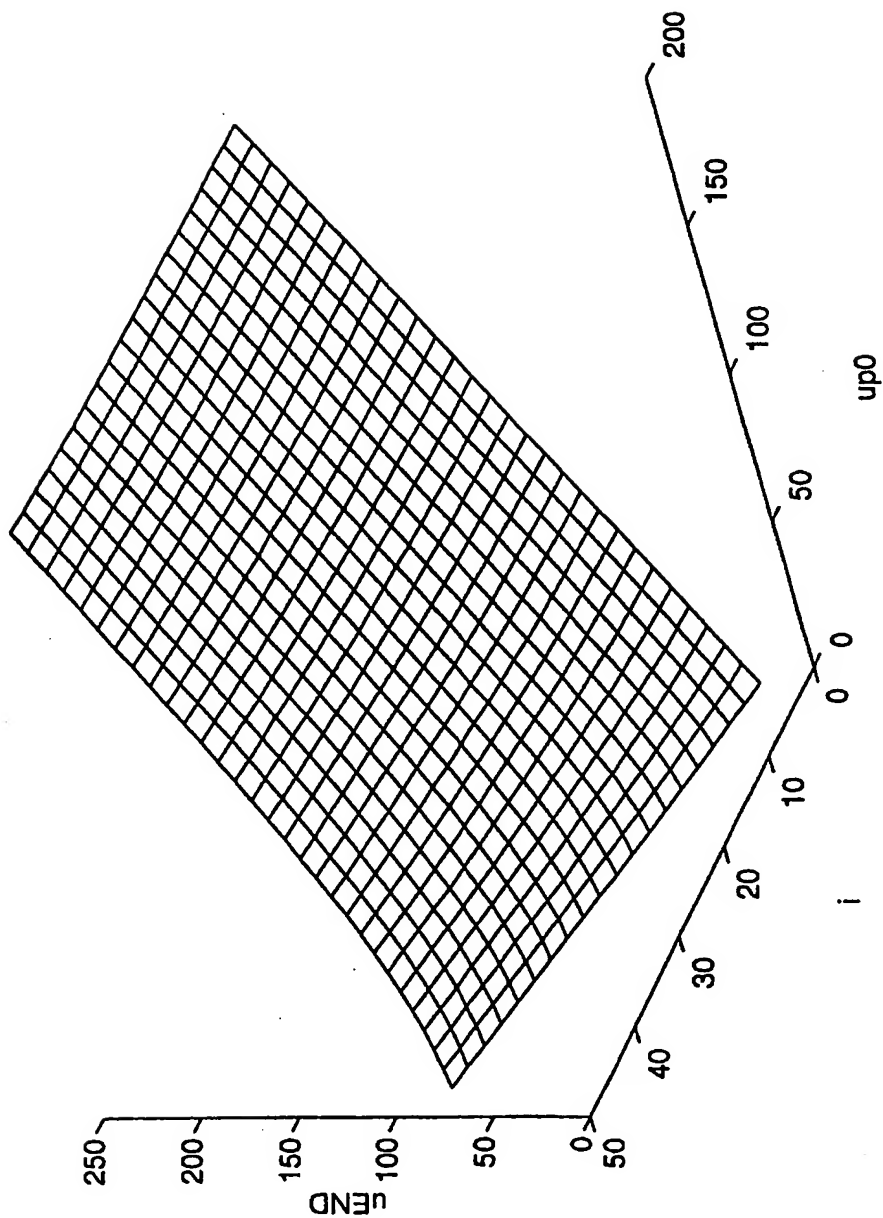


FIG. 7

BEST AVAILABLE COPY

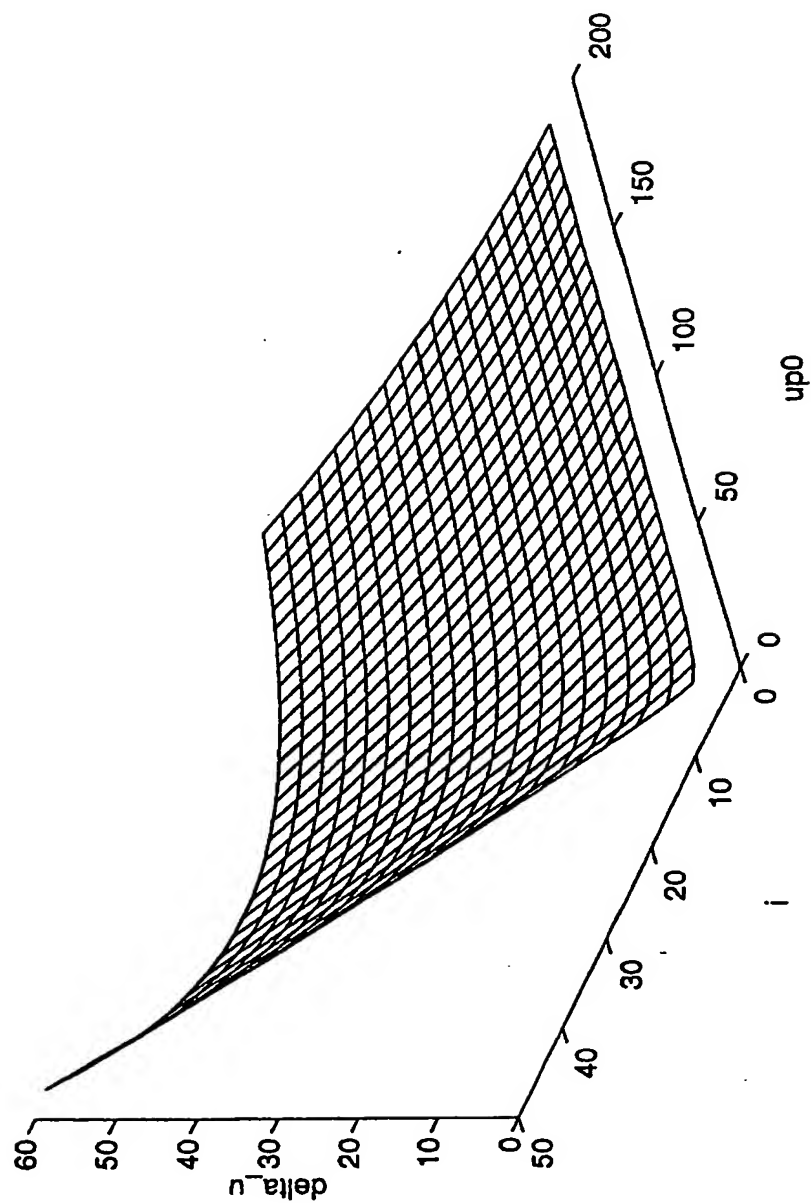


FIG. 8

BEST AVAILABLE COPY

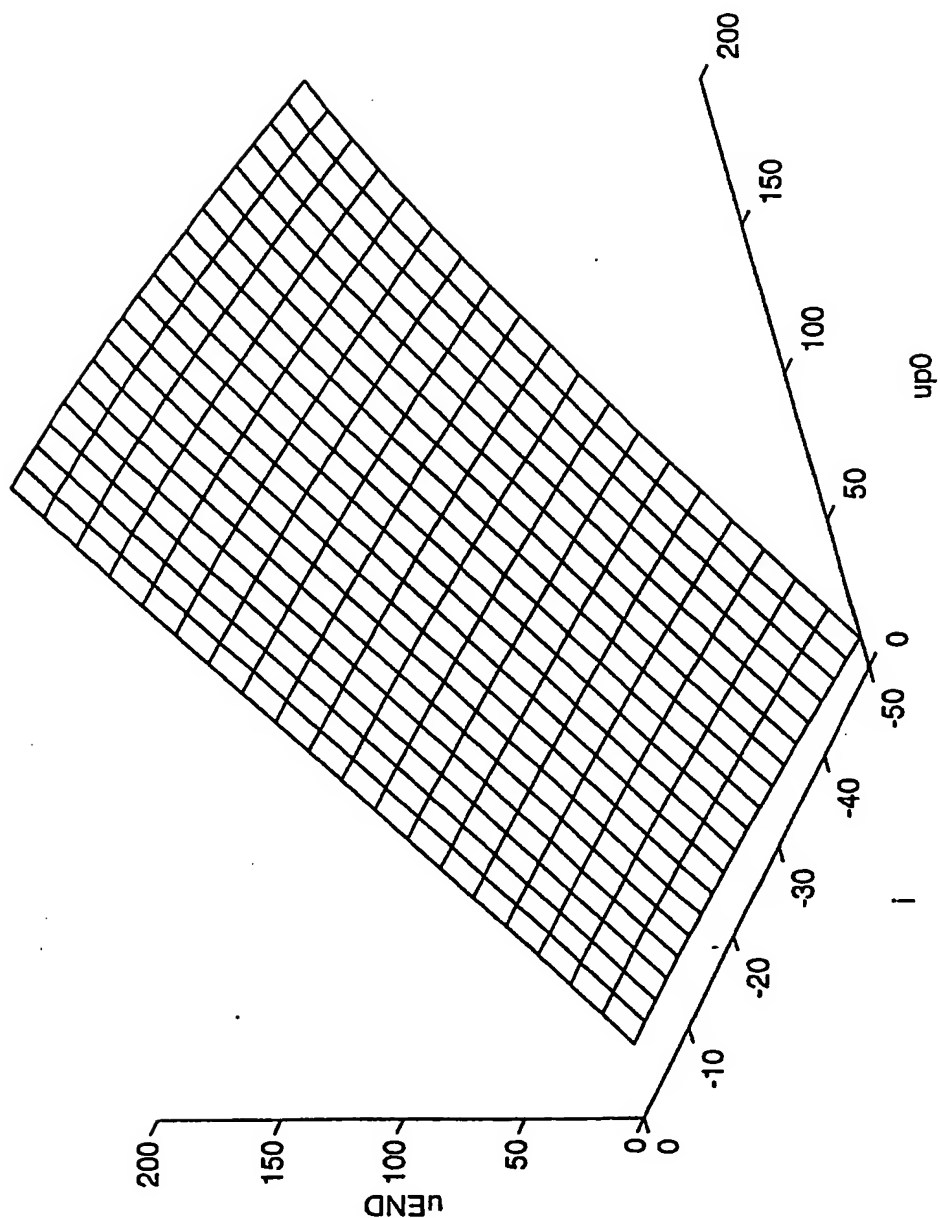


FIG. 9

BEST AVAILABLE COPY

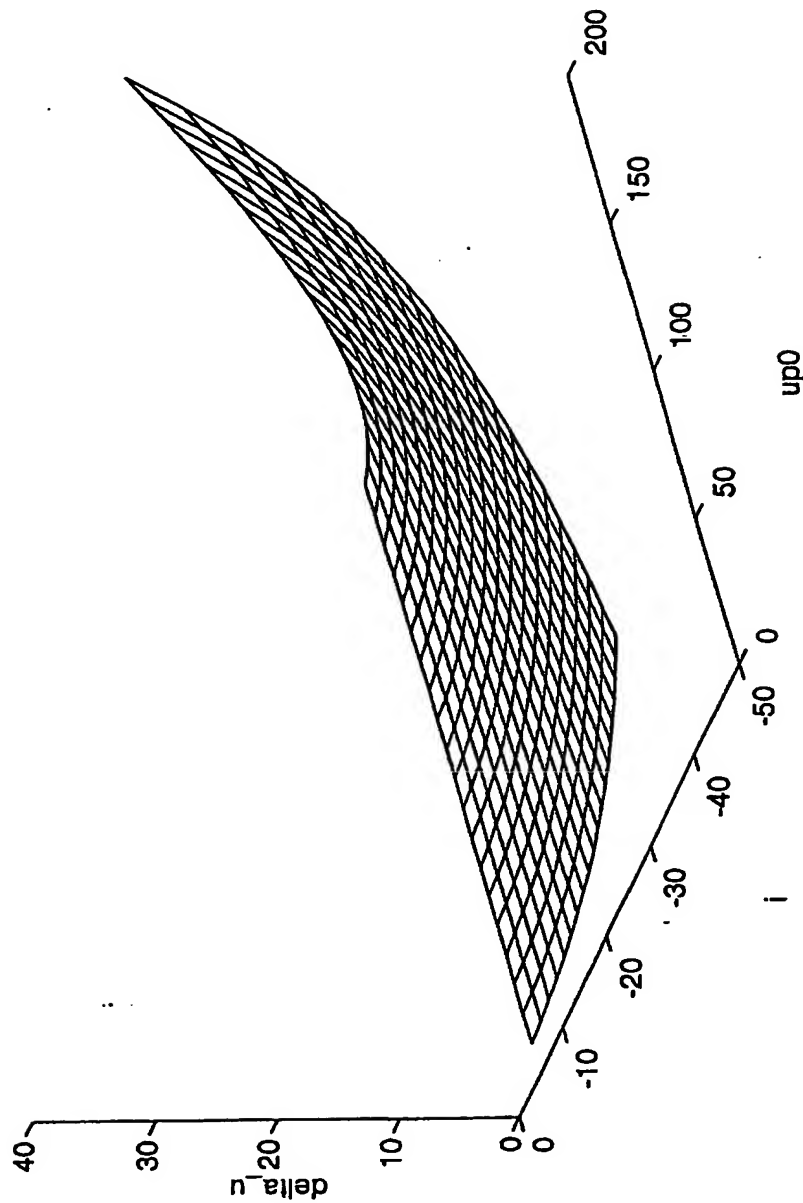


FIG. 10

BEST AVAILABLE COPY

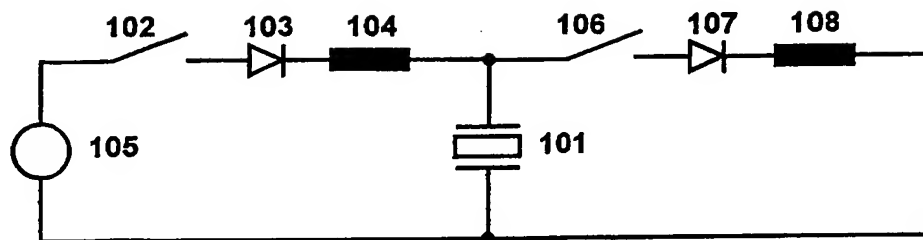


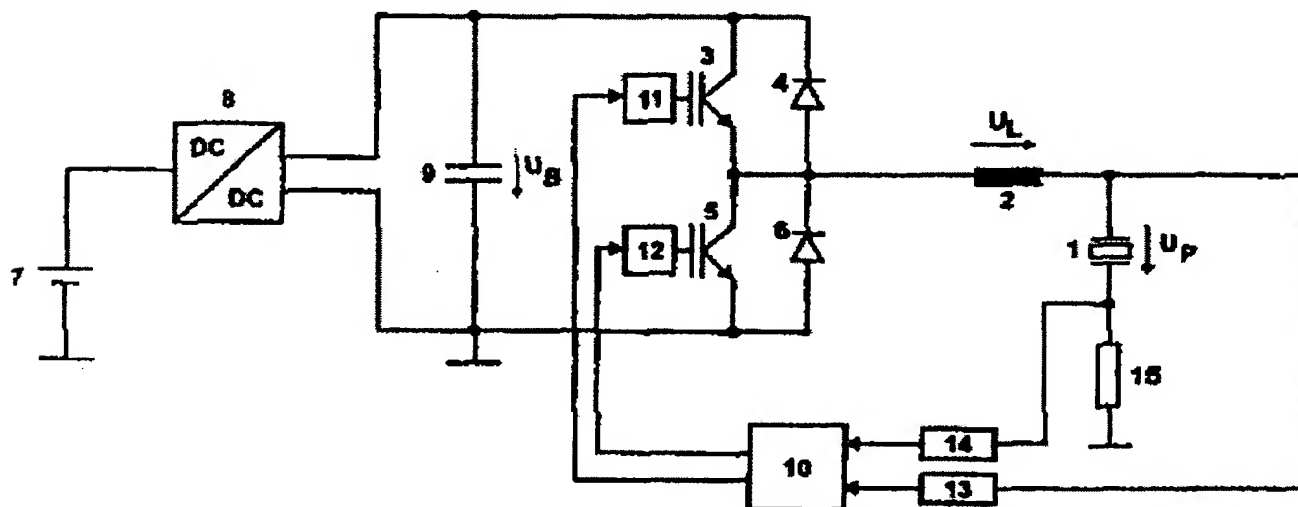
FIG. 11

BEST AVAILABLE COPY



AN: PAT 1999-581398  
TI: Charging and discharging piezoelectric element to desired voltage  
PN: DE19814594-A1  
PD: 07.10.1999  
AB: NOVELTY - The method involves ending the charging or discharging process a certain time before the desired voltage is attained at the piezoelectric element. Charging or discharging may involve repeated opening and closing a charge/discharge switch (3) in the charging/discharging circuit. The process may be ended at a point in time at which it can be assumed that the voltage at the piezoelectric element will reach the desired voltage. DETAILED DESCRIPTION - An apparatus for charging and discharging a piezoelectric element is also claimed.; USE - For piezoelectric actuators, such as for fuel injection nozzles in internal combustion engines. ADVANTAGE - Allows piezoelectric element to be charged or discharged exactly to the desired voltage. DESCRIPTION OF DRAWING(S) - Drawing shows an arrangement for charging or discharging a piezoelectric element. Switch 3

PA: (BOSC ) BOSCH GMBH ROBERT;  
IN: HOCK A; REINEKE J; RUEGER J;  
FA: DE19814594-A1 07.10.1999; JP11354853-A 24.12.1999;  
CO: DE; JP;  
IC: F02D-041/20; F02M-051/06; F16K-031/02; H01L-041/09; H01L-041/22;  
MC: V06-N07; V06-U03; X22-A02A;  
DC: Q52; Q53; Q66; V06; X22;  
FN: 1999581398.gif  
PR: DE1014594 01.04.1998;  
FP: 07.10.1999  
UP: 24.12.1999



BEST AVAILABLE COPY